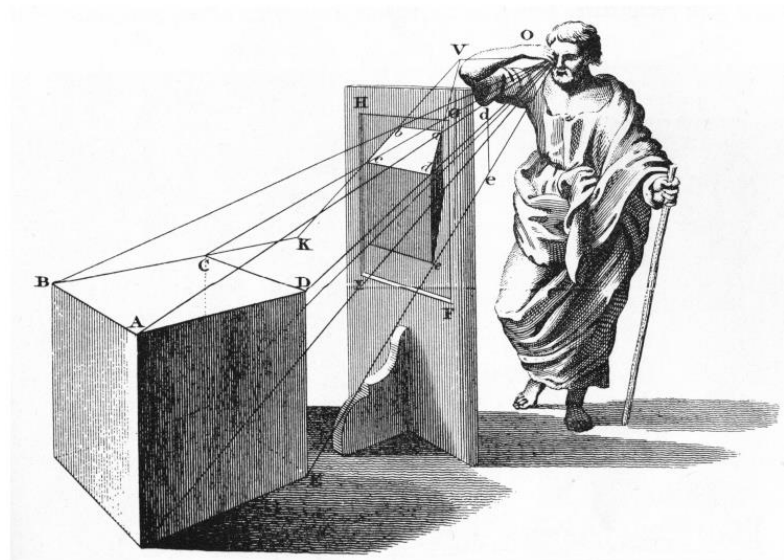
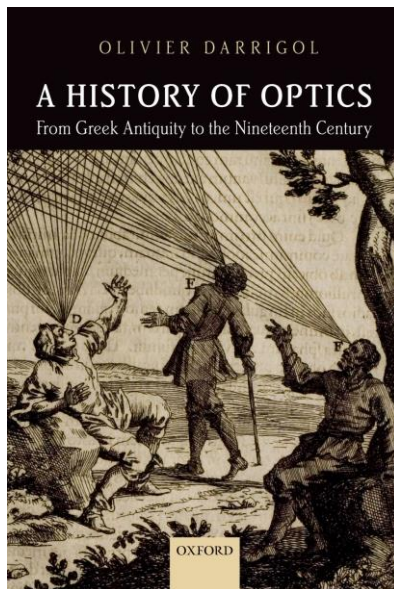


Historie optiky

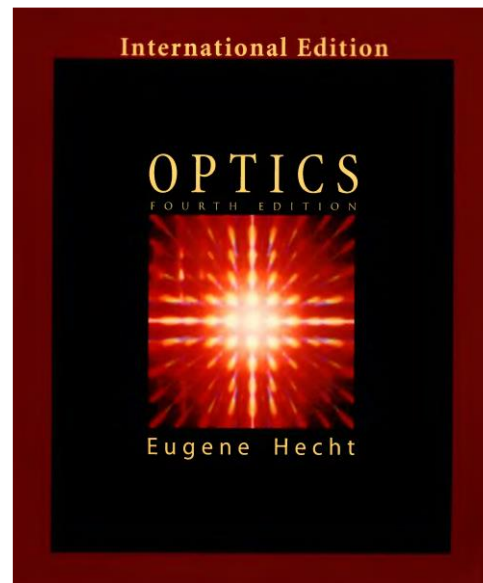
Ing. Jan Novotný, Ph.D.



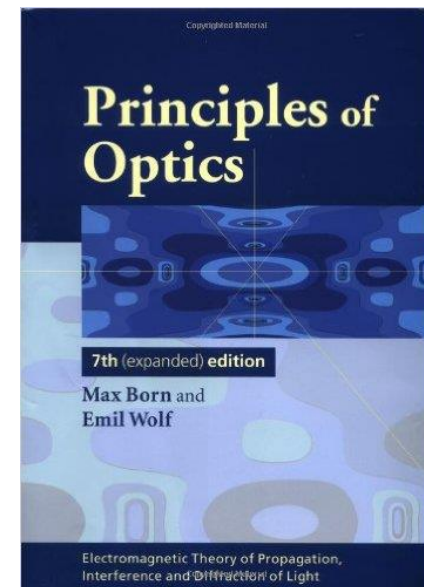
Reference



O. Darrigol
A History of Optics



E. Hecht
Optics



M. Born, E. Wolf
Principles of Optics

Obsah

- **Od starověku po středověk**
Základy geometrické optiky
- **17.-18. století**
Rozmach optiky
- **19. století**
Vlnová teorie a elmag. pole
- **20. století**
Kvantová teorie

Asýrie

cca 3000 př. n. l.

První nalezené čočka

- Nimrud (na území Sýrie)

Využití

- Část dalekohledu?
- Na zvětšení?
- Pouze dekorace?



Egypt

> 1900 př. n. l.

Zrcadla

- Měděná, bronzová.
- Převzato do Říma a Řecka.



1539-1292 př. n. l.

Čína

cca 500 př. n. l.

Filozof MoZi

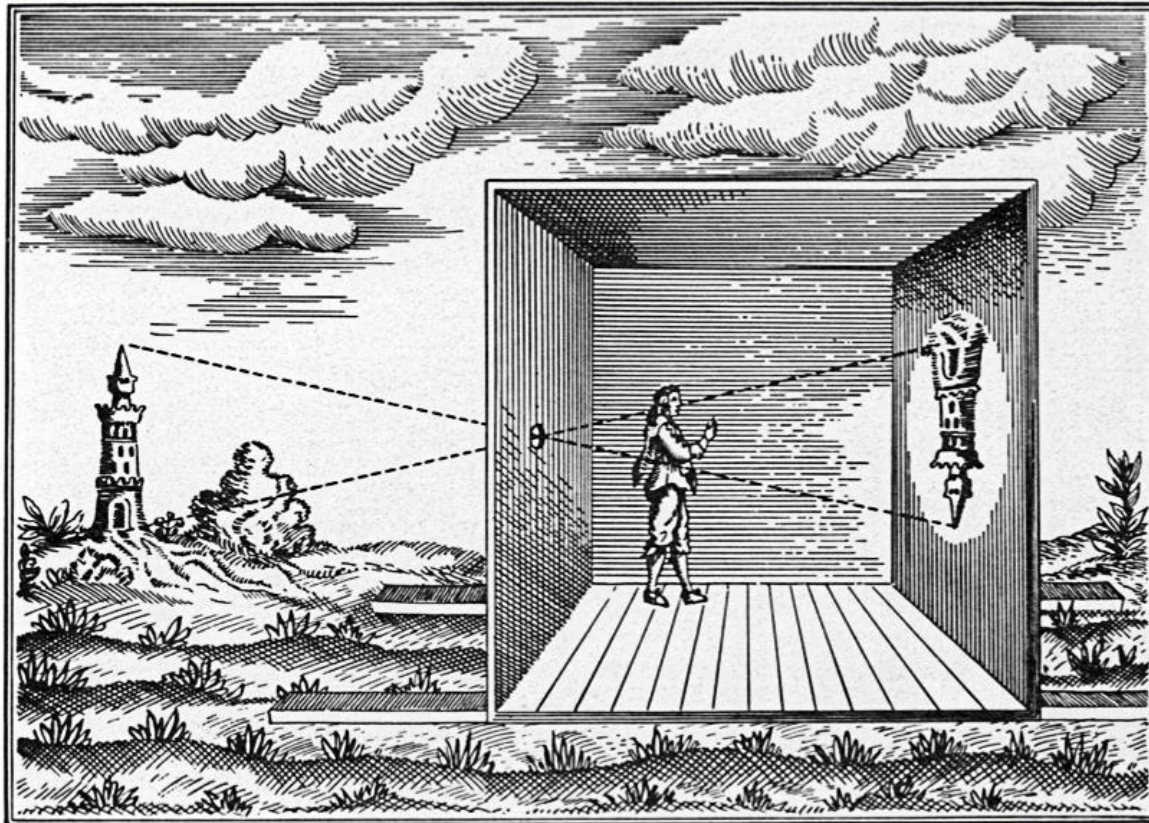
- První známý spis o optice „*Book of Mo Zi*“.
- Přímocharé šíření světla.
- Odraz světla, *Camera obscura*.
- Ploché, konvexní/konkávni zrcadla.



MoZi

Camera obscura

Dírková / temná komora



Řecko

< 500 př. n. l.

8

Řeční filozofové / matematici

- Empedocles (490-430 př.n.l.) – světlo je vysíláno z očí.
- Democritos (460-370 př.n.l.).
- Platón (472-347 př.n.l.) – deformace předmětu ponořeného do kapaliny (spis „Republika“).
- Aristoteles (384-322 př.n.l.) – *camera obscura* (promítal slunce), pozoroval funkci clony, odmítl teorii o vysílání paprsků z oka.
- Euklides (cca 325-260 př.n.l.) – spis „Optica“, zkoumal geometrii perspektivu, přímočaré šíření světla, lom světla,
- počátky geometrické optiky na Evropském kontinentu.

Řecko

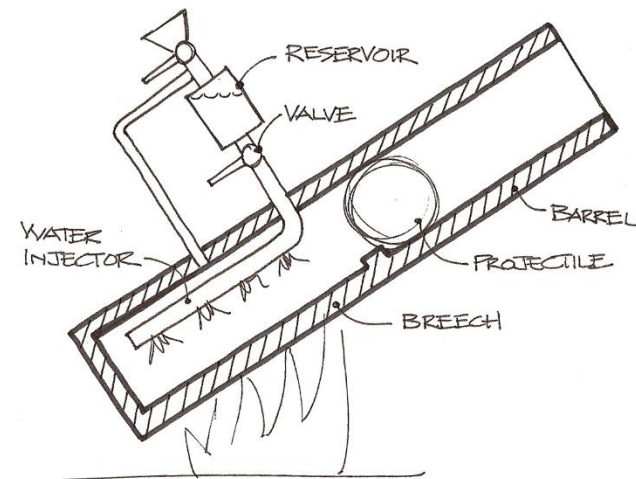
< 500 př. n. l.

Archimedes (287-212 př.n.l.)

Významný matematik, dobývání Syrakus Římany (212 př.n.l.).



„Burning mirror“



Parokanon

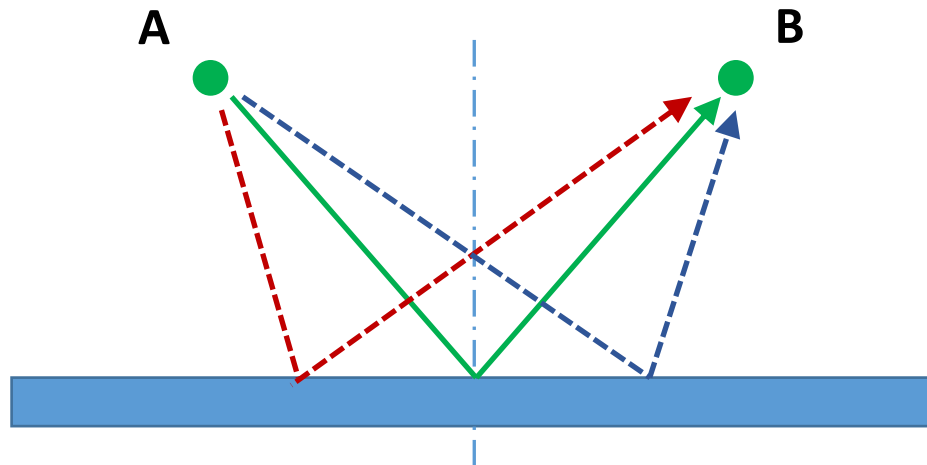
Řecko

10

počátek n. l.

Hero z Alexandrie (10-70)

- Autor „*Catoptrica*“.
- Světlo cestuje tak, aby dráha byla nejkratší, zákon odrazu.



Řím

počátek n. l.

Claudius Ptolemaeus (85-170)

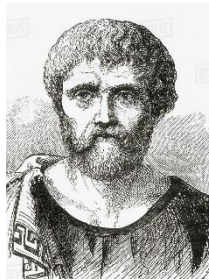
- „Optics“, 5 knih o optice
- Experimentálně naměřil úhly lomů v různých prostředích - empiricky popsal zákon lomu – pro malé úhly (uhel lomu je úměrný úhlu dopadu)



Řím

počátek n. l. – 5. století

Z mnohých pramenů je zřejmé, že Římané používali jednoduché optické prvky pro zvětšování.



Seneca (287-212 př.n.l.)

Zvětšovací efekt nádob naplněných vodou

.. doba temna ..

cca 5.-10. století

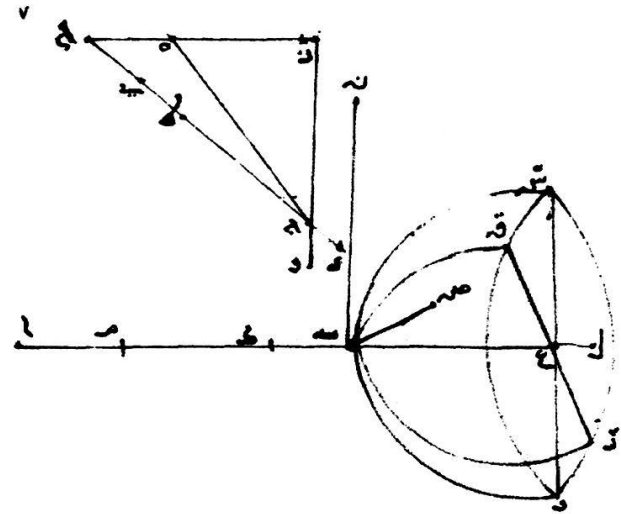
- Po pádu římské říše (475) začala doba temna pro jakýkoli výrazný vědecký pokrok.
- Centrum vědění se z řecko-římské křesťanské kultury přesunulo spíše do arabských zemí.

Arabské země

cca 10.století

Ibn Sahl (940-1000)

- Fokusace paprsků zrcadly a čočkou, “On Burning Mirrors and Lenses”.
- Rovnice pro lom (600 let před Snellem a Descartem).
- Počítal správné tvary čoček pro konkrétní ohniskové vzdálenosti.



لانه ان ماتة عليها سطح مستوي غيره فلان هذا السطح يقطع سطح برص
 على نقطة ب فلا بد من ان يقطع احد خطي ب ن برص فليكن ذلك
 الخط مبصر والفصل المشترك بين هذا السطح وبين سطح قطع ق ر
 خط ب ن فلان هذا السطح يماس سطح ب على نقطة ب فخط
 ب ن يقطع ق ر على ب ر على نقطة ب وكونك خط مبصر وهذا محال
 فلا يماس سطح ب على نقطة ب سطح مستوي غير سطح ب ن ص

Arabské země

cca 10.století

Ibn al-Haytham (Alhazen) (965-1040)

- Otec moderní optiky, spis „Book of Optics“.
- Podrobná a systematická studie řeckých poznatků.
- Paprsek dopadu a odrazu jsou ve stejné rovině, kolmé na povrch.
- **Paprsky se šíří do oka.**
- Zkoumal sferická a parabolická zrcadla.
- Základní princip funkce lidského oka.
- Rychlost paprsků je konečná .
- Vědecká metoda: „Vše musí být prokázáno“.



Evropa

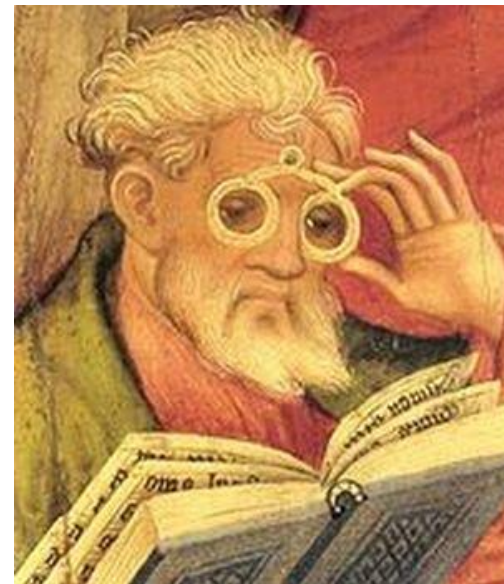
10. – 16. století

Bez výrazných vědeckých pokroků, pouze překlady děl řeckých a arabských myslitelů.

Roger Bacon (1214-1294)

- Nejspíše je autorem myšlenky používat čočky pro korekci zraku.
- Možnost kombinace čoček pro vytvoření teleskopu.

Postupné rozšíření nositelných brýlí.
Možný vynálezce byl **Salvino D'Armato** (1284).



17.-18. století

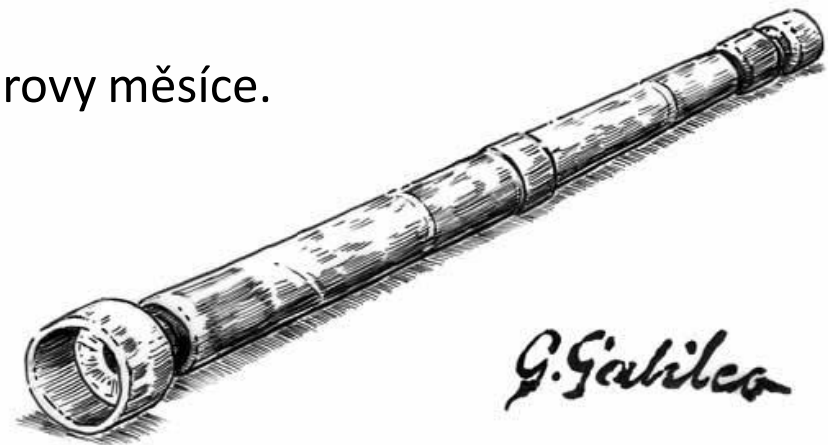
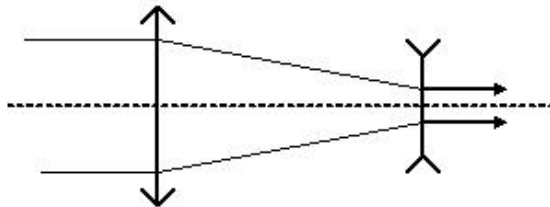
Rozmach optiky

Hans Lippershey (1587-1619)

- 1608, patent na přístroj konstrukce teleskopu.

Galileo Galilei (1564-1642)

- 1608, sestavil teleskop (rozptylka + spojka)
- zvětšení 33x, špatný obraz.
- Objevil hory na Měsíci, Jupiterovy měsíce.

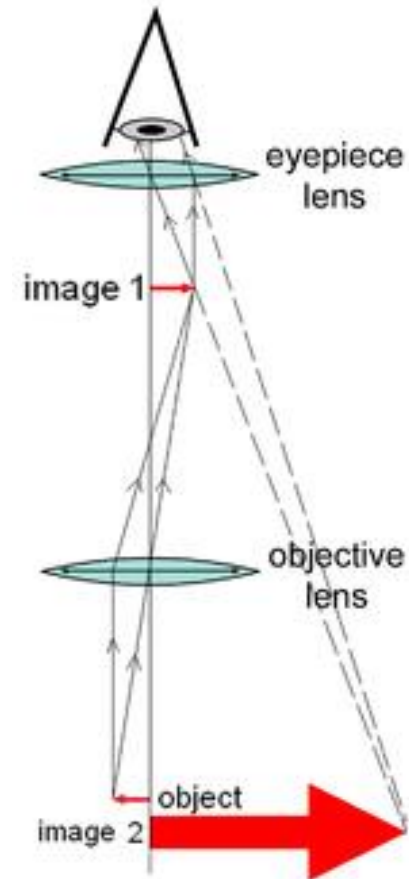


17.-18. století

Rozmach optiky

Zacharis Jansen (1588-1632)

- Konstrukce mikroskopu, zvětšení 9x.
- Jednoduchý i složený typ.

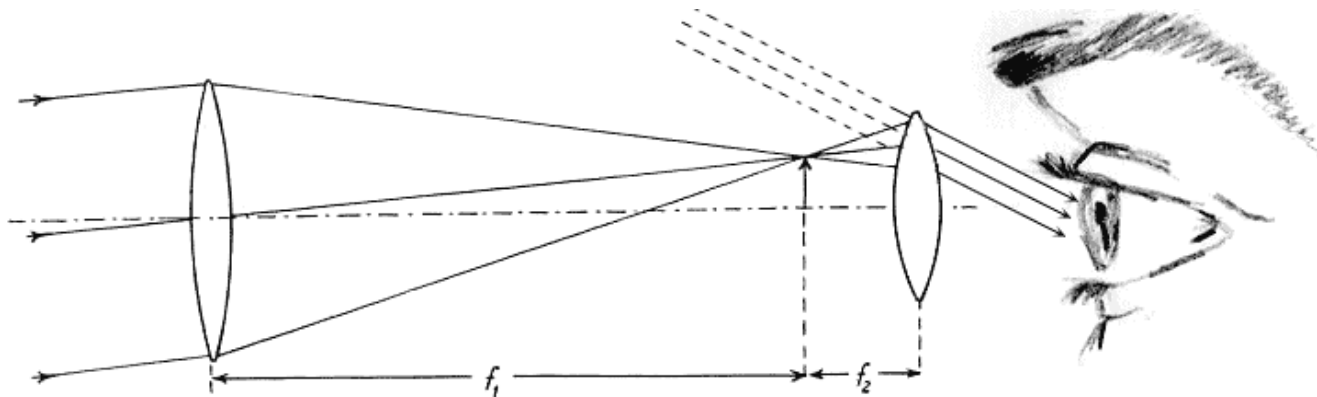


17.-18. století

Rozmach optiky

Johannes Kepler (1564-1642)

- Spis *Dioptrika*.
- Úprava dalekohledu (s konvexní oční čočkou).
- Objevil totální odraz, zákon převrácených čtverců.



Snellův zákon

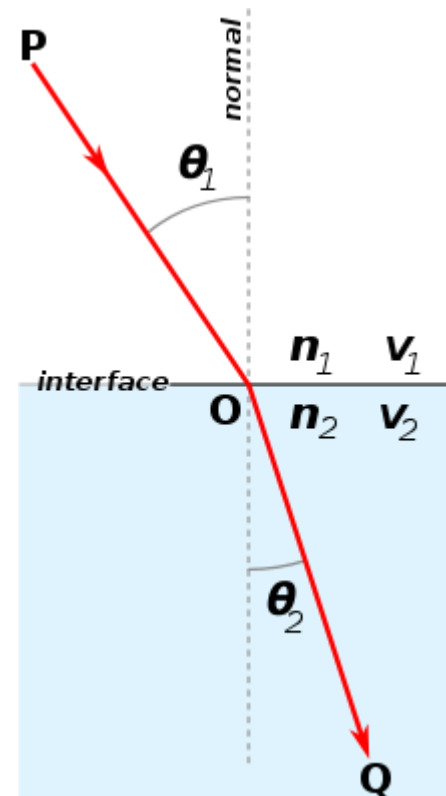
17./18. století - Rozmach optiky

Willebrord Snell (1591-1626)

- Empiricky odvodil zákon lomu.
- Klíčový okamžik v historii optiky.

Snellův zákon:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

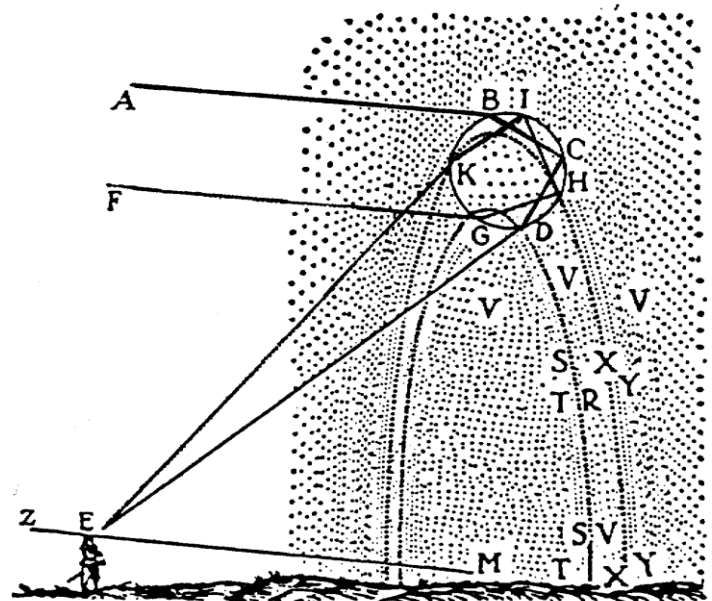


17.-18. století

Rozmach optiky

Rene Descartes (1596-1650)

- Publikoval dnes známý tvar Snellova zákona pomocí \sin .
- Světlo se šíří jako tlakový pulz tzv. „eterem“ (*La Dioptrique*, 1637).
- Barva je způsobena různými rychlostmi rotace částic eteru.
- Studoval duhu a zjistil pod jakým úhlem je viditelná.



Fermatův princip

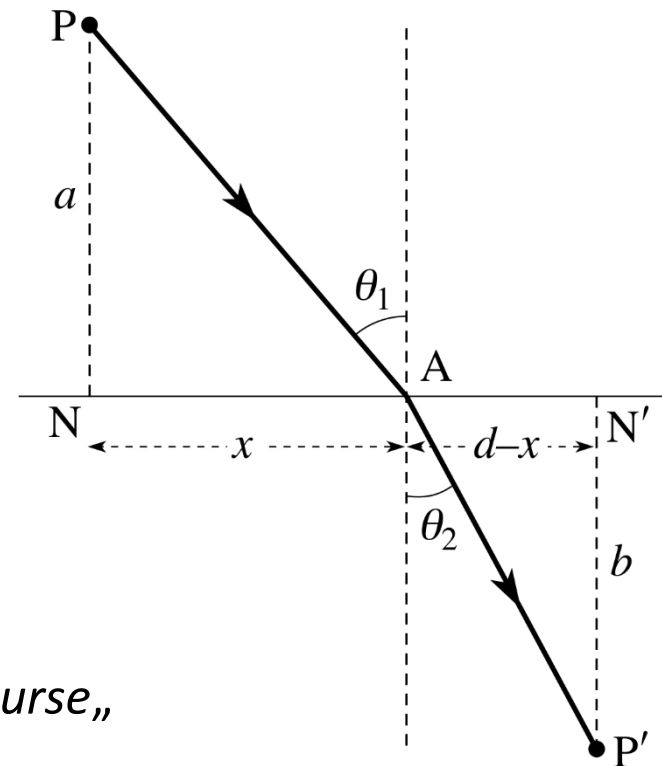
17./18. století - Rozmach optiky

Pierre Fermat (1601-1665)

1657, formuloval zákon lomu pomocí principu nejmenšího času = nejkratší optické dráhy S :

$$S = \int_P^{P'} n \cdot ds$$

"Nature always acts by the shortest course,,



Fermatův princip

17./18. století - Rozmach optiky

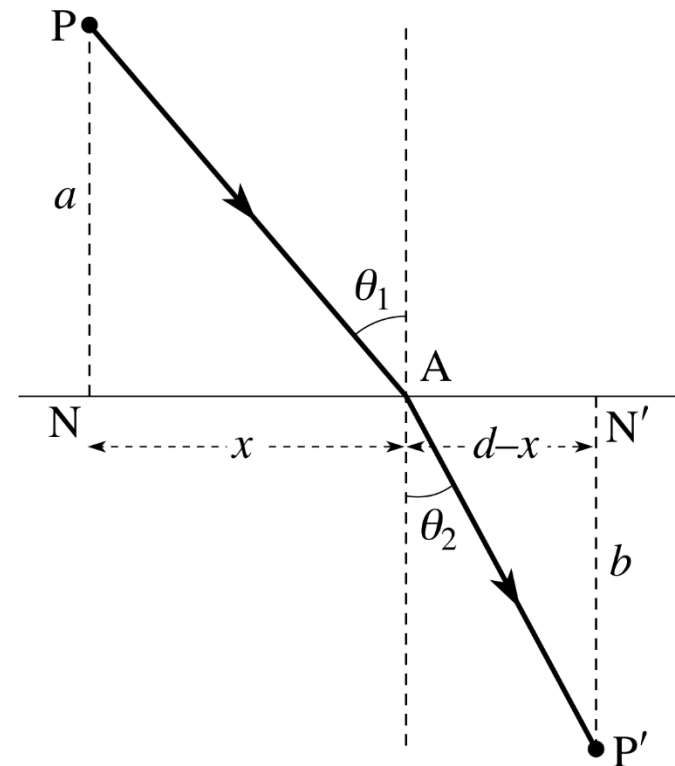
Hledáme extrém funkce
vyjadřující čas či optickou dráhu.



$$\frac{dS}{dx} = 0$$



**Odvození zákona odrazu
a Snella zákona lomu.**

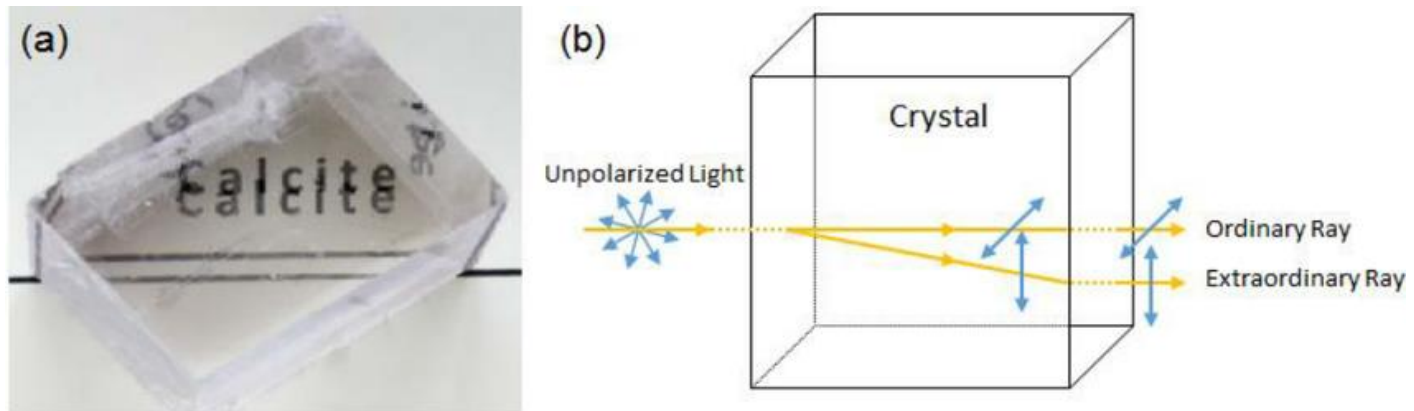


Dvojlom

17./18. století - Rozmach optiky

Rasmus Bartholin (1625-1698)

První pozorování důsledků polarizace světla + anizotropního prostředí
- pozorování dvojlomu na krystalu kalcitu (CaCO_3).



17.-18. století

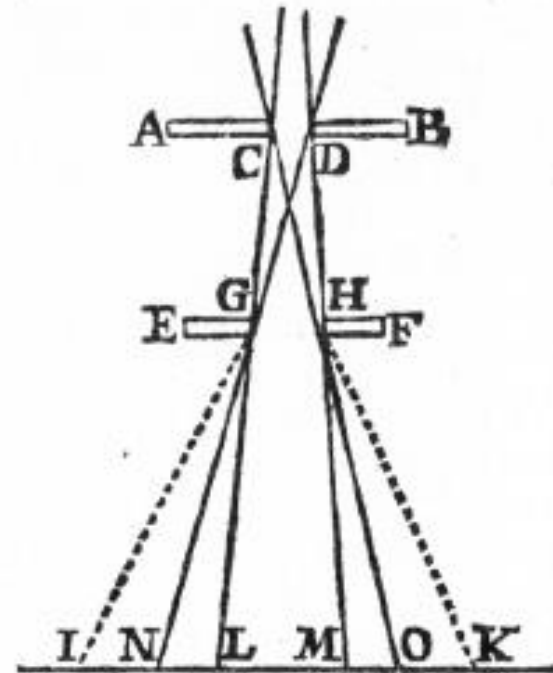
Rozmach optiky

Francesco Maria Grimaldi (1618-1663)

Pozoroval odklon od přímočarého šíření světla, pásy světla ve stínu tyče osvětlené malým zdrojem světla.



Difrakce

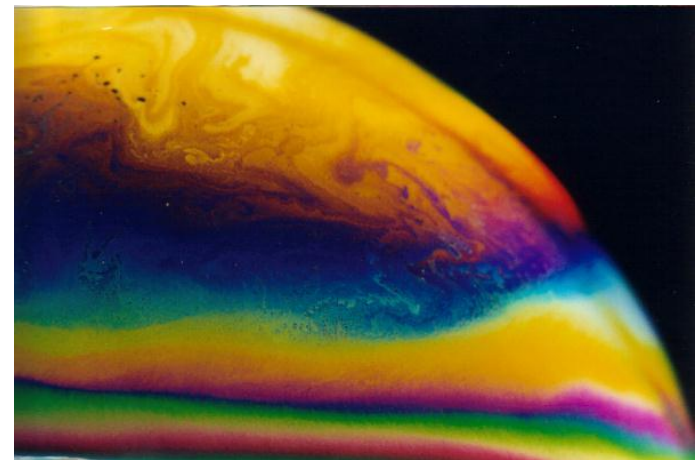


17.-18. století

Rozmach optiky

Robert Hook (1635-1703)

- Pozoroval barevnou interferenci na tenkých vrstvách.
- Světlo je vibrace o velmi vysoké frekvenci s rychlosti šířící se prostorem eteru.
- Každý pulz/vibrující bod generuje něco jako kulovou vlnu - počátek vlnové teorie.



Interference na mýdlové bublině

17.-18. století

Rozmach optiky

Isaac Newton (1642-1727)

- Rozložil sluneční světlo na hranolu (dispersi však zkoumal už **J.M. Marci z Kronlandu** o 24 let dříve).
- Zastáncem částicové teorie (vlny se rozprostírají).
- Navrhoval reflexní teleskopu (první byl **D. Gregory**, 1663).

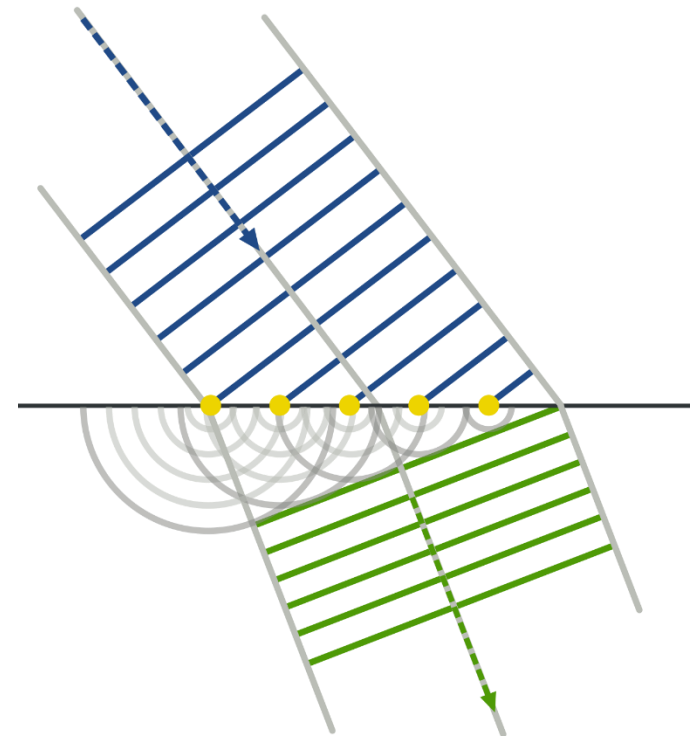


Huygensův–Fresnelův princip

17./18. století - Rozmach optiky

Christian Huygens (1629-1695)

- Rozpracoval vlnovou teorii.
- Každé místo, kam vlnění dospěje se stává zdrojem nové kulové vlny*.
- Světlo zpomalí při přechodu do hustšího prostředí.
- Pomocí vlnové teorie popsal odraz i lom světla.
- Objevil polarizaci (na kalcitu).
- Navrhl okulár (Huygensův).



*Dříve zmíněno také J.M. Marci z Kronlandu

Rozpor na konci 18. století

Světlo je proud částic

Podpořeno silnou autoritou Isaaca
Newtona.

VS

Světlo je vlna

Pod tíhou argumentů a experimentů
získávala na síle.

Rychlost světla

17./18. století - Rozmach optiky

Ole Christensen Romer (1644-1710)

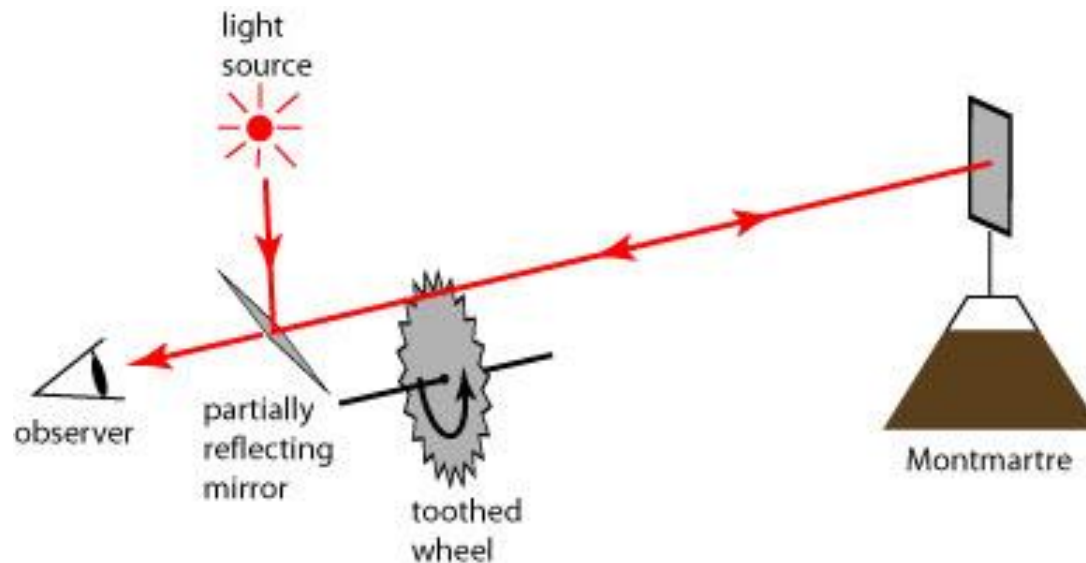
- Experimentálně ověřil, že rychlost světla má konečnou hodnotu.
- Pozorováním několik zatmění měsíce lo Jupiterem.
- Rychlost byla vypočtena jako cca **$2,4 \times 10^8$ m/s** (Newton, Huygens).

Rychlost světla

17./18. století - Rozmach optiky

Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896)

První pozemní měření, použitím dřevěného disku a 8,5 km vzdáleného zrcadla. Rychlosti určena jako $3,153 \times 10^8$ m/s.



Barevná vada

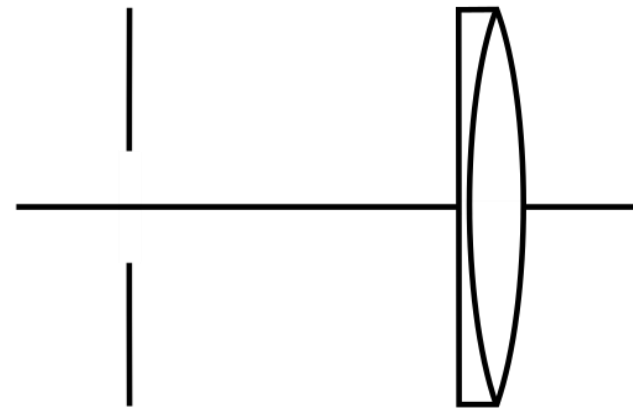
17./18. století - Rozmach optiky

LeonHard Euler (1707-1783)

Objevil princip, jak lidské oko minimalizuje barevnou vadu - kombinaci optických členu s různou disperzí.

John Dollond (1706-1761)

První achromatický dublet - kombinací korunového a flintového skla.



**Dollond (Hall) Achromat Doublet
1754 (1729)**

Youngův experiment

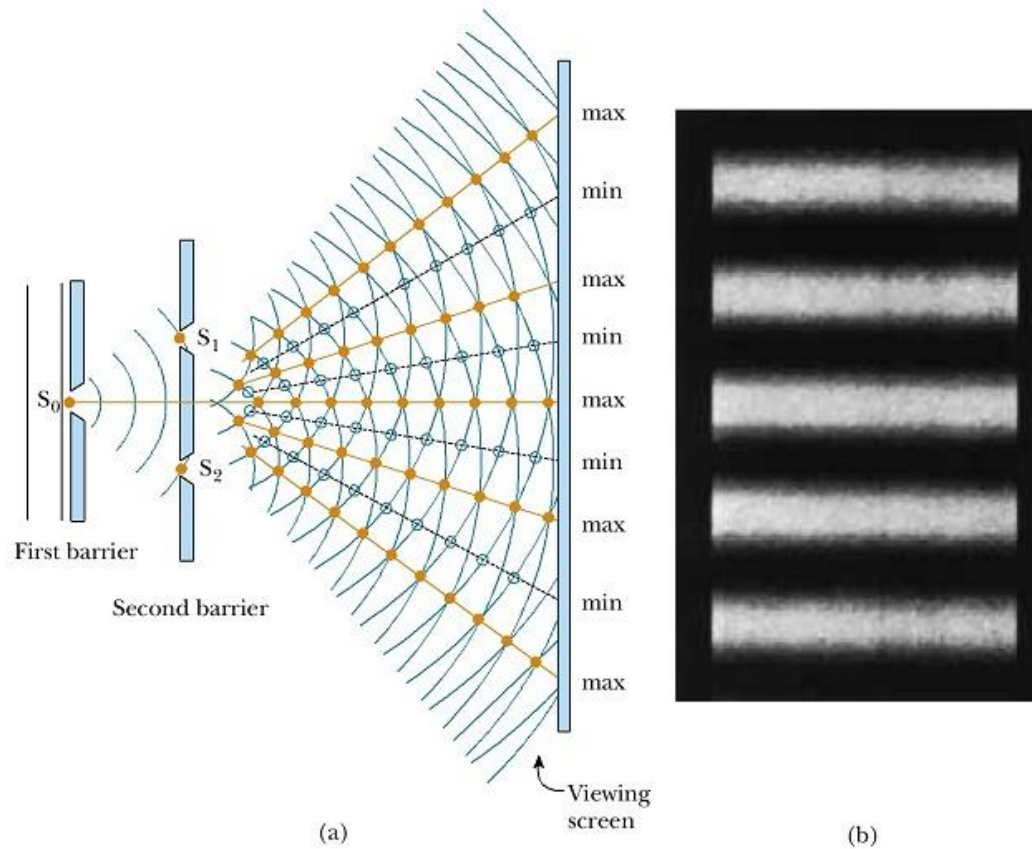
19. století – Vlnová teorie

Thomas Young (1773-1829)

- Youngův experiment - silný impuls vlnové teorii.
- Jeden z nejvýznamnějších mozků své doby.
- Vysvětlil interferenční proužky na tenkých vrstvách.
- Stanovil vlnové délky jednotlivých barev.

Young's experiment

19. století – Vlnová teorie



Vlnová teorie

19. století

Augustin Jean Fresnel (1788-1827)

- Spojil Huygensův vlnový koncept a princip interference, objasňující, jak přímočaré šíření světla, tak difrakci (**Huygensův-Fresnelův princip**).
- Vypočítal difrakční obrazce na různých překážkách a aperturách.



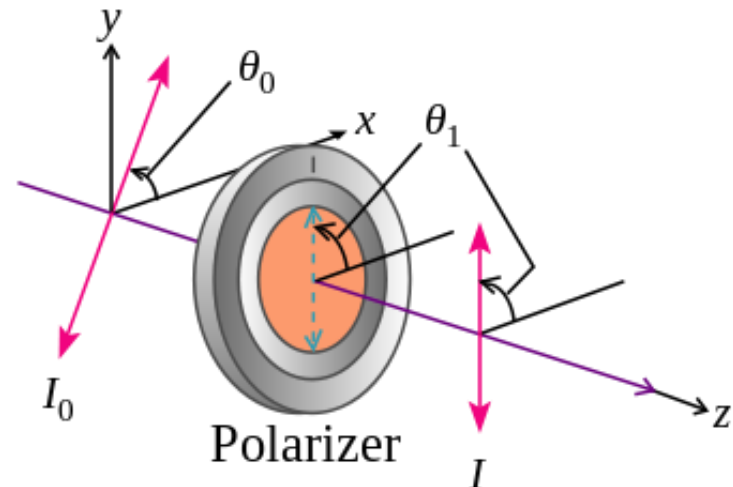
Polarizace

19. století

Etienne Louis Malus (1775-1812)

- Objevil polarizaci také při odrazu (doposud byla známa jen při dvojlomu v kalcitu (CaCO_3))
- Malusuv zákon:

$$I = I_0 \cdot \cos^2(\theta_1 - \theta_2)$$



Vlnová teorie

19. století

Dominique Francois Arago (1786-1853)

- Spolu s Fresnelem a Youngem objevil, že světlo je vlnění příčné.
- Objevil kruhovou polarizaci a vyrobil polarizační filtr.

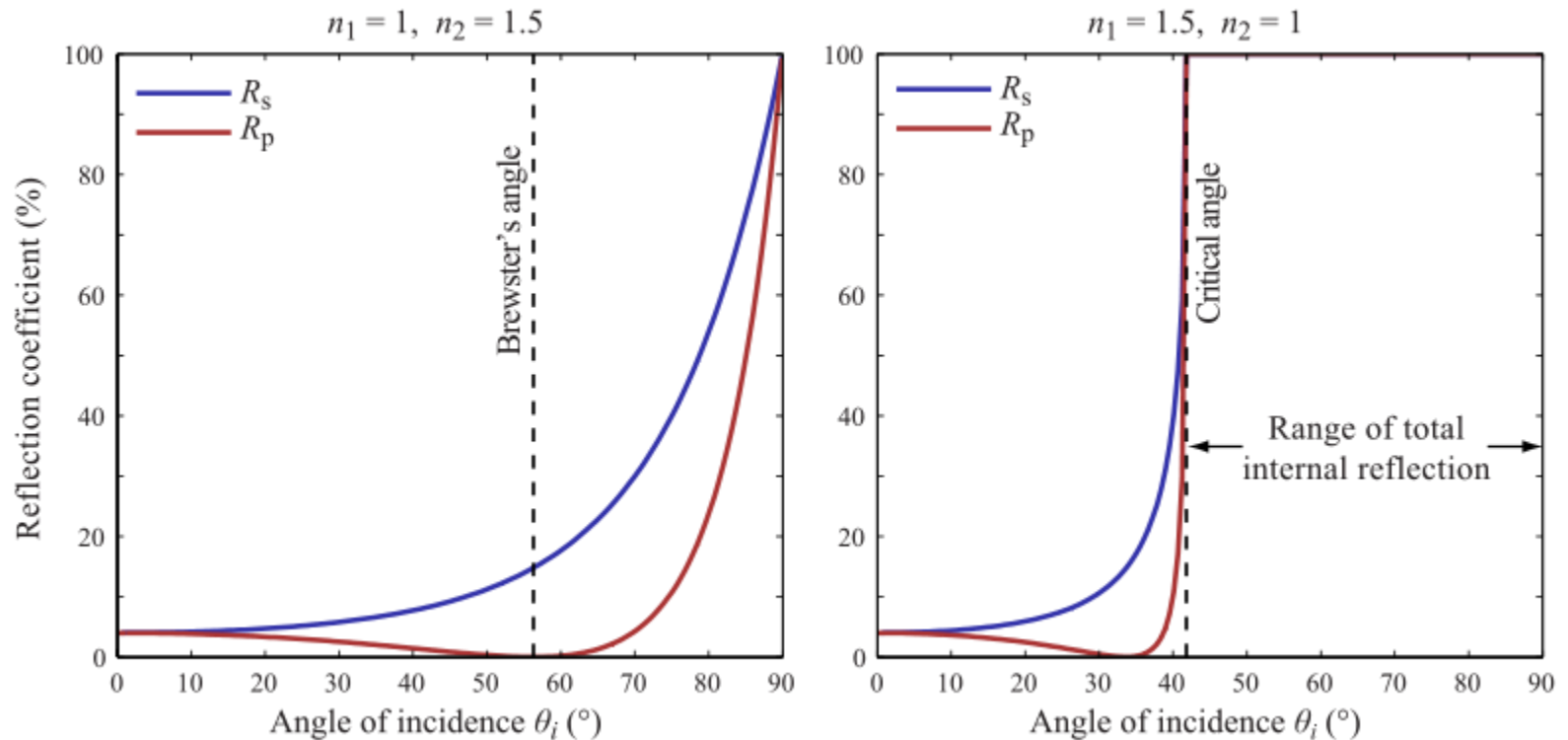


Na základě těchto poznatků Fresnel odvodil vztahy pro **relativní intenzitu odraženého a prošlého paprsku skrze rozhraní.**

$$R_s = \left| \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \right|^2 \quad R_p = \left| \frac{Z_2 \cos \theta_t - Z_1 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_t + Z_1 \cos \theta_i} \right|^2$$

Vlnová teorie

19. století

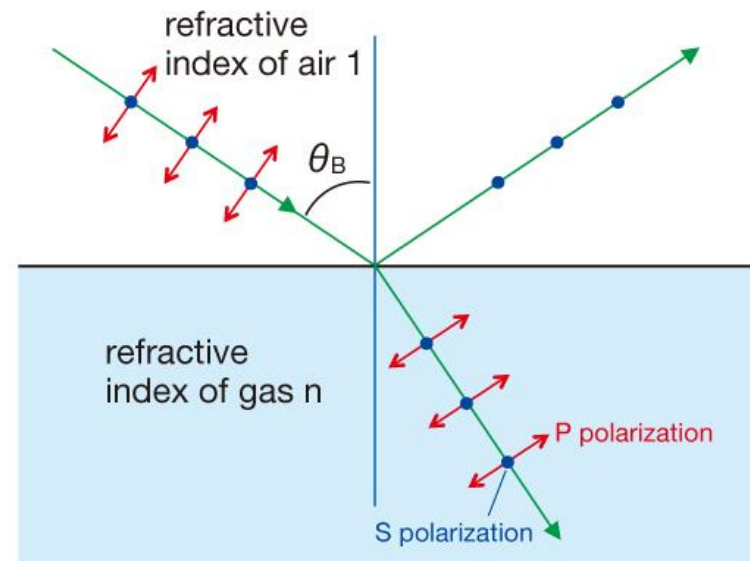


Vlnová teorie

19. století

David Brewster (1781-1868)

- Popsal napěťový dvojlom.
- Nalezl Brewsterův úhel (1816).



Elmag. pole

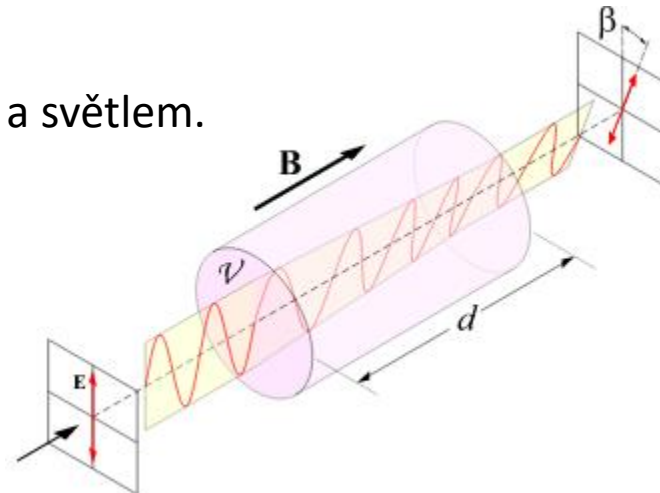
19. století

Michael Faraday (1791-1867)

Polarizace může být stočena silným magnetickým polem – „Faraday effect“.



První důkaz vazby mezi elmag. polem a světlem.



Elmag. pole

19. století

James Clark Maxwell (1831-1879)

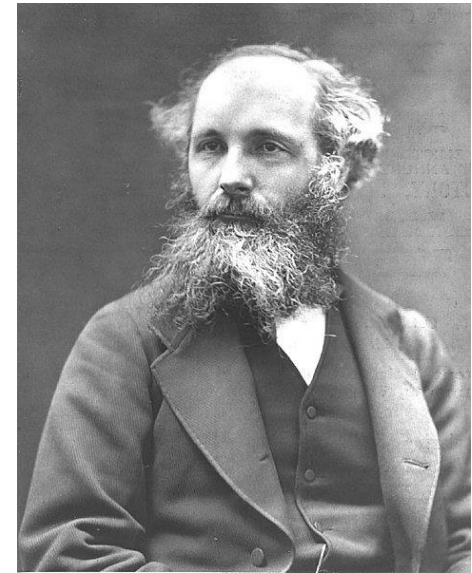
Komplexně shrnul empirické vědomosti o elektřině a magnetismu do 4 **Maxwellových rovnic**:

(i) $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$ (Gauss's law),

(ii) $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ (no name),

(iii) $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ (Faraday's law),

(iv) $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ (Ampère's law with Maxwell's correction).



Elmag. pole

19. století

James Clark Maxwell (1831-1879)

- Teoreticky prokázal, že elmag. pole se může šířit éterem jako příčná vlna
- Vypočítal fázovou rychlost vlny z materiálových konstant:
- Výsledek ve shodě z experimenty, **3,107 x 10E8 m/s.**
- Závěr byl neodvratný:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$



"Světlo je vzruch v elektromagnetickém poli, šířící se ve formě vln eterem,,

- Maxwellovy závěry byly experimentálně prokázány až po jeho smrti **Heinrichem Hertzem (1857-1894)** v 1886-88.

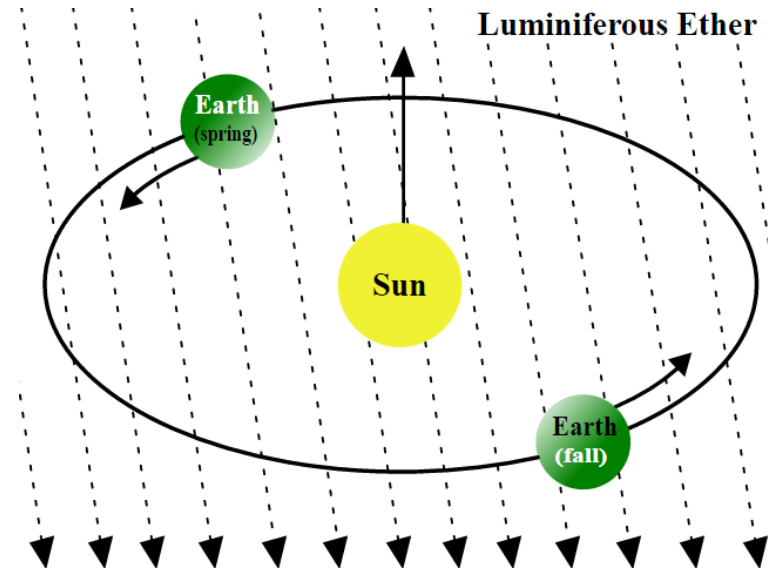
Světelný éter

19. století

Pakliže se šíří vlna, musí se mít čím šířit – všude-přítomný „Světelný éter“

Vlastnosti éteru

- Absolutně tuhý, neboť rychlost světla je vysoká
- Řídký, protože musel pronikat vším a neklást odpor
- Je absolutní vztažnou soustavou pro stanovení rychlosti světla



Světelný éter

19. století

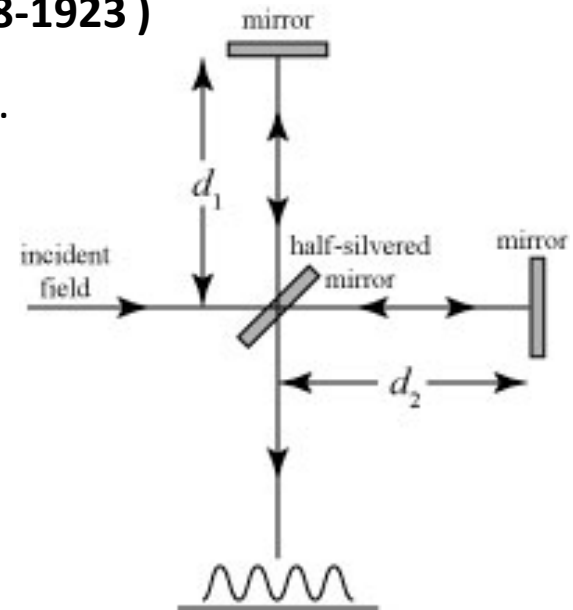
Země éterem proplouvá – tedy v její vztažné soustavě se v různých směrech musí rychlost světla lišit – díky „éterovému větru“ (Fresnel).

A. A. Michelson (1852-1931) + E. W. Morley (1838-1923)

- 1887, experimentální pokus s interferometrem.
- Nepodařilo se naměřit žádný fázový posun světla z obou větví



Země je vůči éteru v klidu



Světelný éter

19./20. století

Jules Henri Poincare (1854-1912)

„Our aether, does it really exists?“

Albert Einstein (1879-1955)

„Light is always propagated in free space with defined velocity c which is independent of the state of motion of emitting body“

Einstein odmítl existenci eteru v rámci Speciální teorie relativity

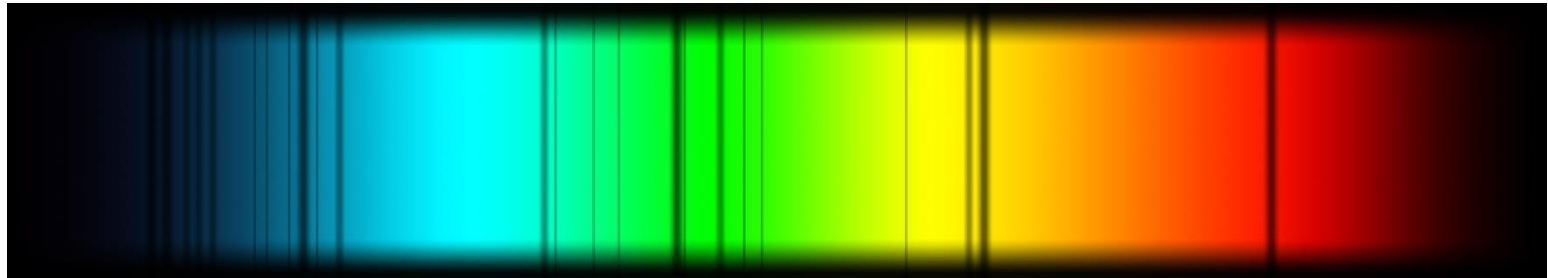
Emise / absorpce

19. století

Stále zůstávala nevysvětlena řada jevů se světlem souvisejících, a to zejména z oblasti absorpce a emise světla.

William Hyde Wollaston (1766-1828)

Temné čáry v rozloženém spektru slunečního záření.



Emise / absorpce

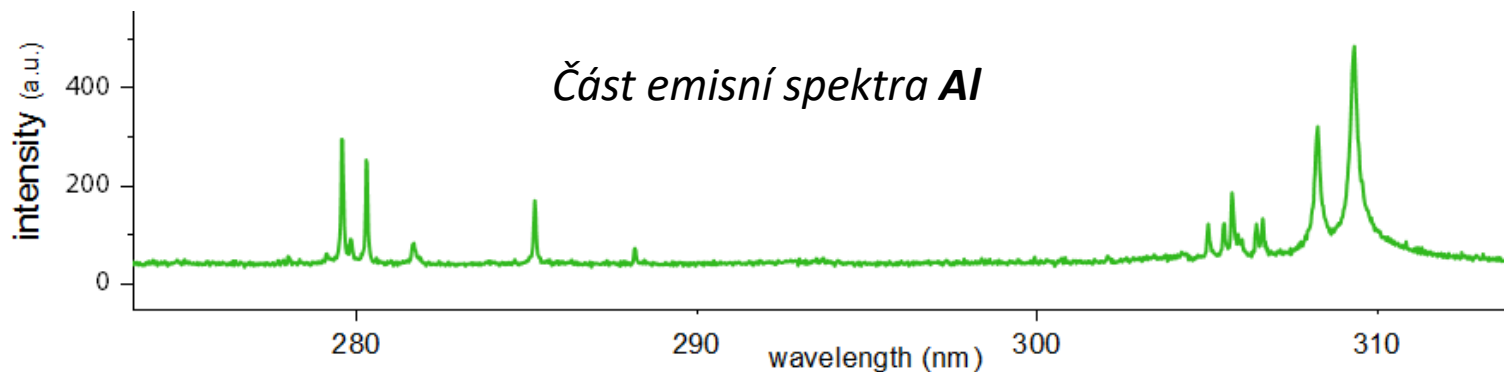
19. století

Joseph Fraunhofer (1787-1826)

Objevil dublet sodíku, vyráběl difrakční mřížky, stanovil vlnové délky - *Fraunhoferovy čáry*, vyráběl objektivy na základě výpočtů skel a lámavých ploch.

Gustav R. Kirchhoff (1824-1887) a Robert W. Bunsen (1811-1899)

Každý atom má charakteristické emisní/absorpční spektrum.



Fraunhoferovy čáry

19. století

Absorpční čáry chladných plynů ve sluneční fotosféře

A, B - kyslík

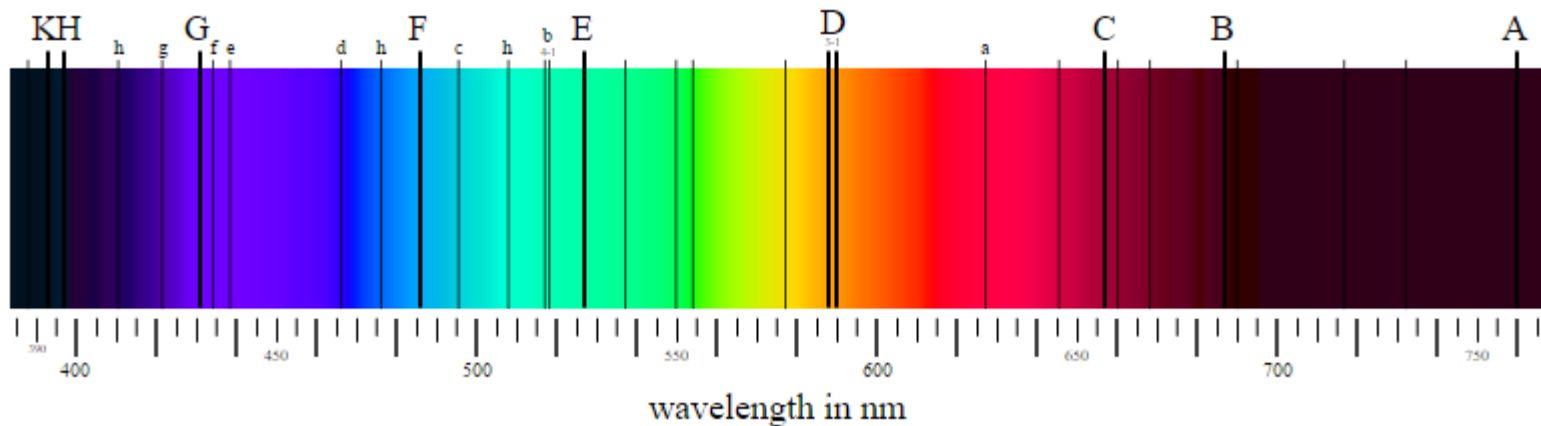
E - železo

C, F, G - vodík

K, H - vápník

D₁, D₂ – sodík

Mg, Hg



Záření černého tělesa

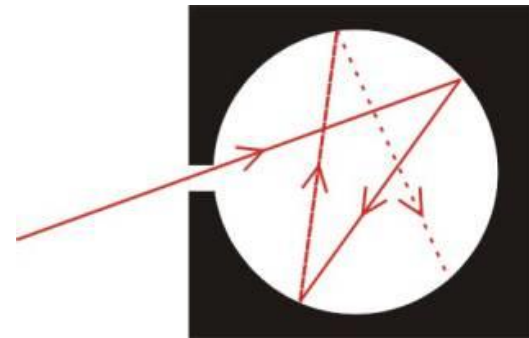
19. století

Zkoumány princip a zákonitosti absorpce/emise



Model **absolutně černého tělesa**

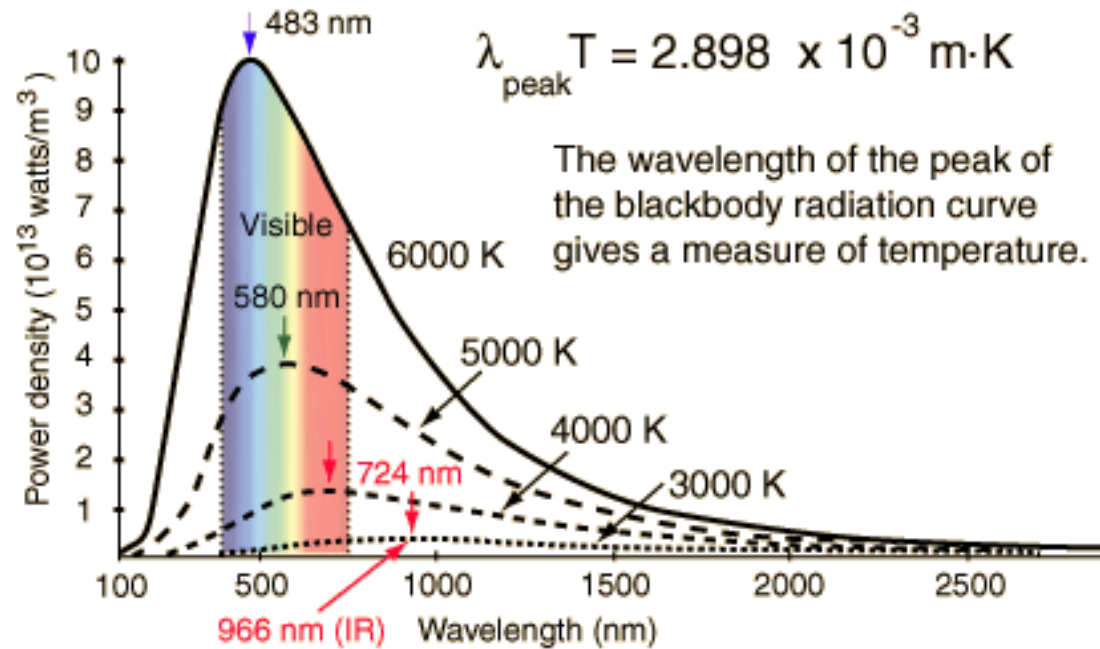
- Malý otvor + dutina s černými matnými stěnami
- Dopadající energii neodráží, nerozptyluje – jen absorbuje
- Absorpce i emise na všech vlnových délkách



Záření černého tělesa

19. století

Vyzařovací charakteristika – experimentálně zjištěna



Záření černého tělesa

19. století

L. Boltzmann (1844-1906), Jozef Stefan (1835-1893)

1879, *Stefanův-Boltzmannův zákon* o celkové intenzitě záření

$$I = \sigma T^4$$

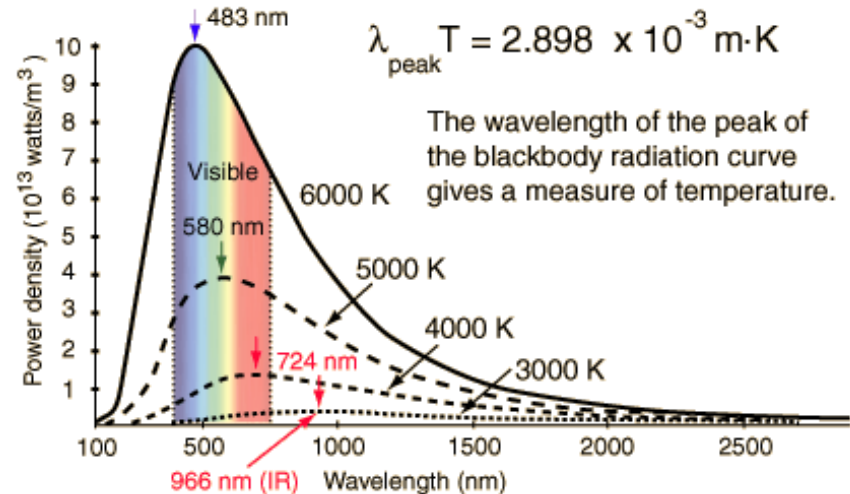
kde σ je Stefan-Boltzmanova konstanta

Wilhelm Wien (1864-1928)

1893, *Wienův posunovací zákon*:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

kde b je Wienova konstanta



Záření černého tělesa

19. století

Stále chyběl zákon pro výpočet vyzářovací charakteristiky

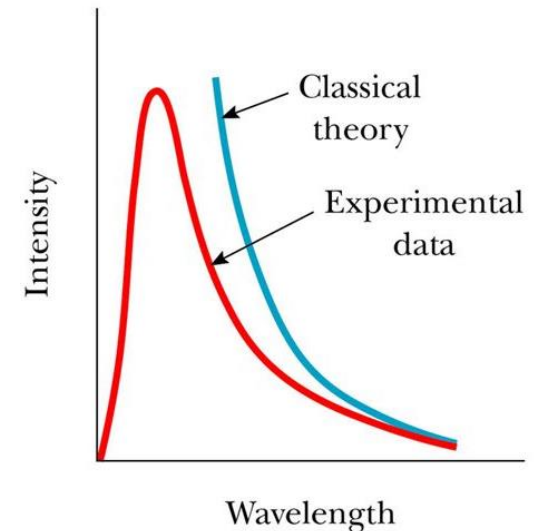
$$H = f(\lambda, T) = ?$$

L. Boltzmann, J. Stefan, Lord Raleigh, James Jeans

Dle klasické mechaniky – čím kratší vlnová délka
tím vyšší vyzářená energie



Ultrafialová katastrofa



Záření černého tělesa

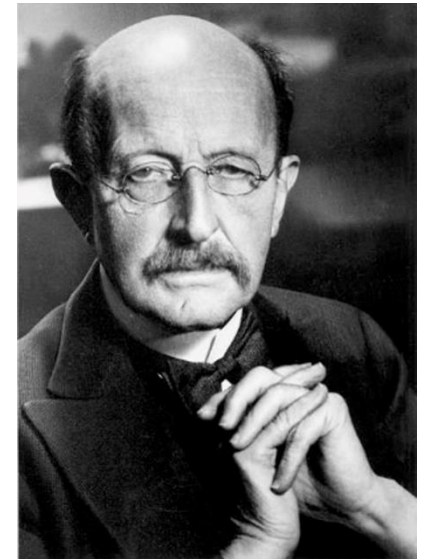
19. století

Max K. E. L. Planck (1858-1947)

1901, Hypotéza kvantování energie oscilátorů



Energie je předávána ve formě kvant!
nikoli spojitě



Záření absolutně černého tělesa:

$$H_{0\lambda} = \frac{2\pi hc}{\lambda^5 (e^{hc/k\lambda T} - 1)}$$

Záření černého tělesa

19. století

Max K. E. L. Planck (1858-1947)

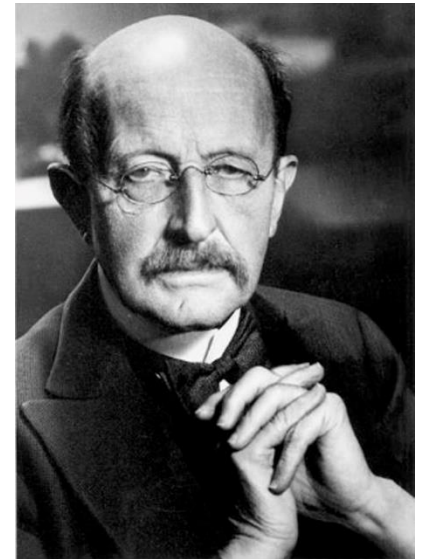
Energie kvanta:

$$E = hf$$

kde h je Planckova konstanta, f je frekvence záření.



Zrod kvantové mechaniky



Foton

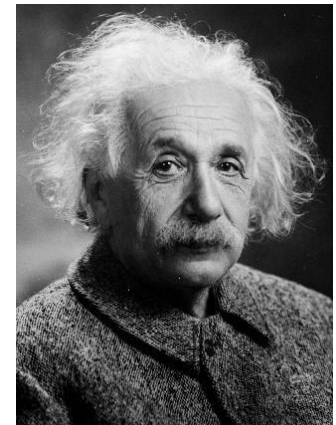
Počátek 20.st

Albert Einstein (1879-1955)

1905, Světlo se skládá z částic o energii $E = hf$



Foton*



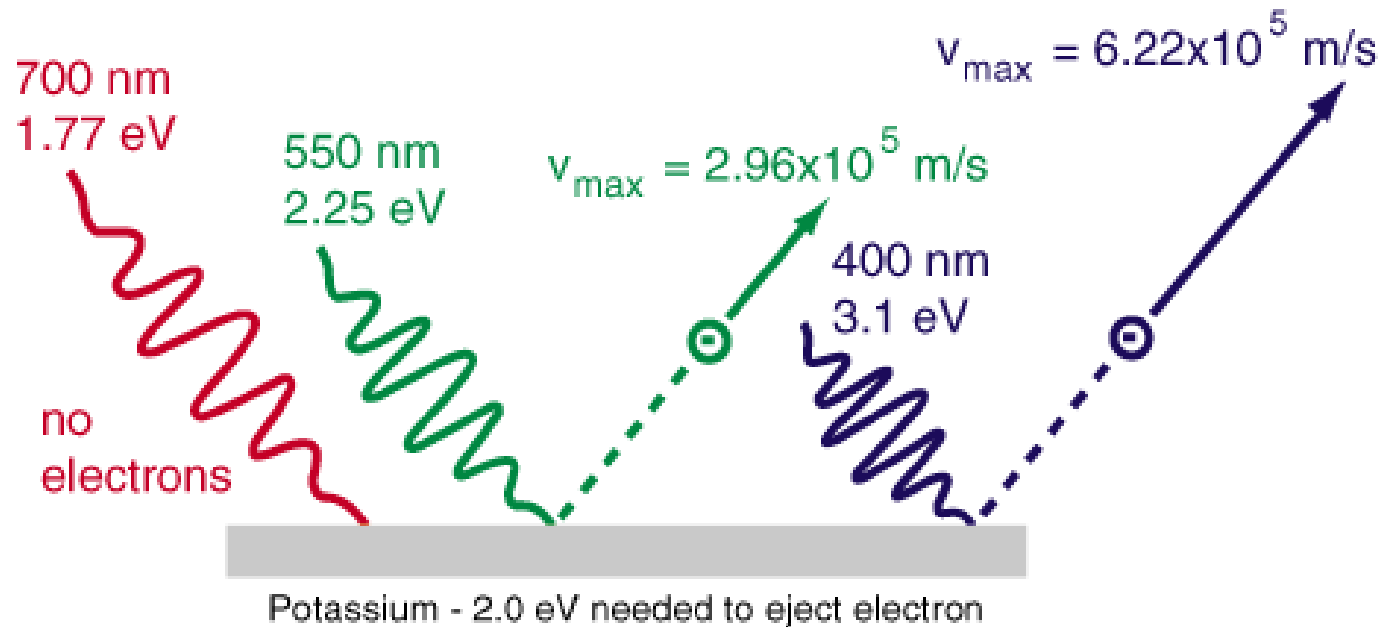
Vysvětlení fotoelektrického jevu ** (Nobelova cena, 1921)

1. Nastává při frekvencí fotonů vyšších než určitá mez.
2. Energie uvolněných elektronů závisí pouze na frekvenci elektronů.
3. Počet uvolněných elektronů je úměrný počtu dopadajících fotonů.

*Gilbert N. Lewis (1926) **Pozoroval již Heinrich Hertz (1887)

Fotoelektrický jev

Počátek 20.st

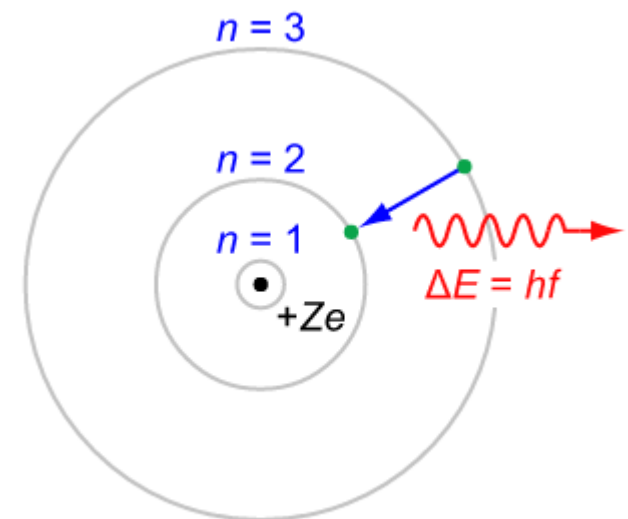
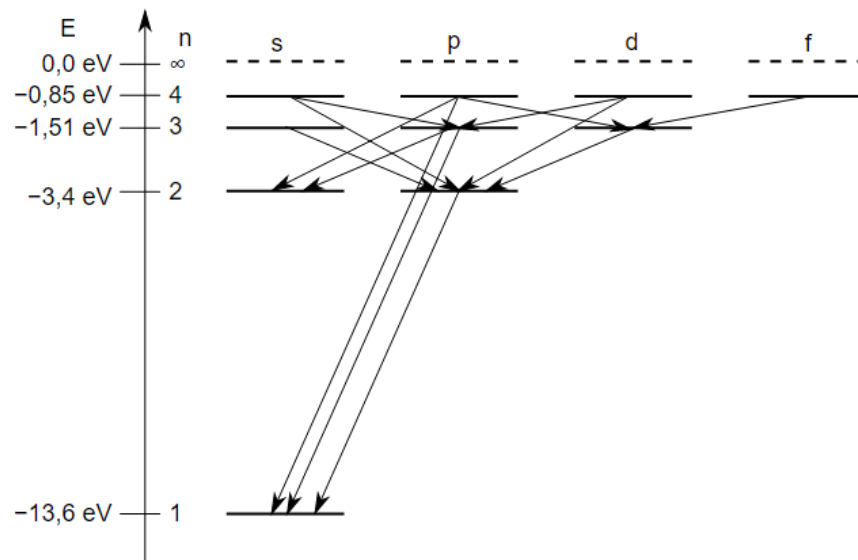


Bohrův model atomu

Počátek 20.st

Niels Henrik David Bohr (1885-1962)

Model atomu vodíku, výpočet energiových hladin – vlnové délky emisních čar.



Kvantová mechanika

Počátek 20.st

Kvantová mechanika se stala do konce 20. let 20.st velmi dobře popsanou a prozkoumanou teorií.

- Niels Bohr
- Max Born
- Werner Heisenberg
- Erwin Schrodinger
- Louis De-Broglie
- Wolfgang Pauli
- Paul Dirac
- aj.

Dvojí povaha světla



Vlnové jevy

- Interference světla
- Difrakce světla
- Polarizace světla



Částicové jevy

- Fotoelektrický jev
- Comptonův rozptyl

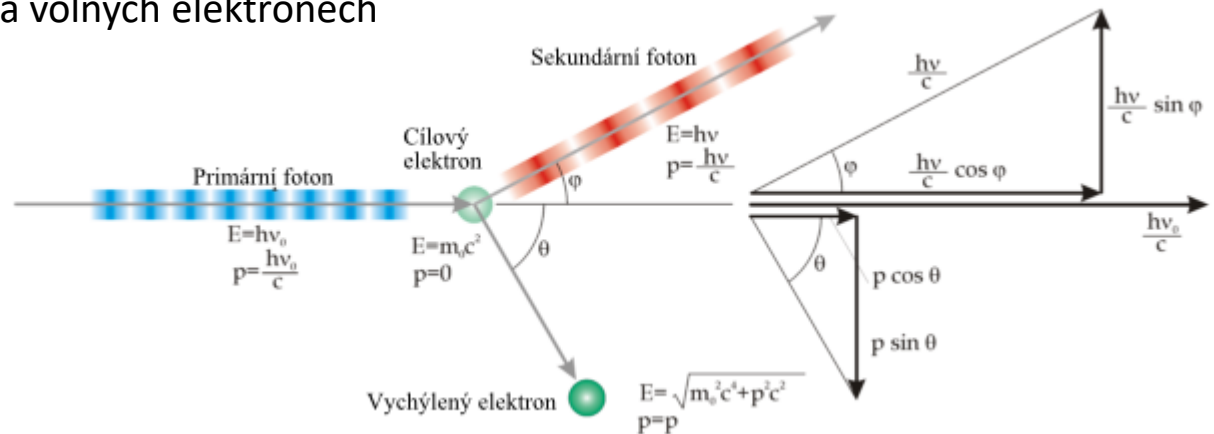
ČÁSTICOVĚ-VLNOVÝ DUALISMUM

Světlo je elmag. vlnění s projevy částicovými i vlnovými

Comptonův rozptyl

Částicové vlastnosti světla

- Zákon zachování hybnosti po elastické srážce
- Detekovány 2 spektrální čáry
 1. Rozptyl na pevně vázaných elektronech
 2. Rozptyl na volných elektronech



Nobelova cena, 1927, Arthur Holly Compton

Částicově-vlnový dualismus

Částice s nenulovou klidovou hmotností

Louis de Broglie (1892-1987)

- 1924, hypotéza, že nejen elmag. záření, ale i pevné látky vykazují dualitu
- Vlnová délka částice o hybnosti p je dána vztahem

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \longrightarrow \quad \text{kde } \lambda \text{ je tzv. De Broglieova vlnová délka}$$

- Roku 1927 potvrzeno pro elektrony (Davisson, Germer)*
- Později i pro atomy, protony, neutrony a molekuly

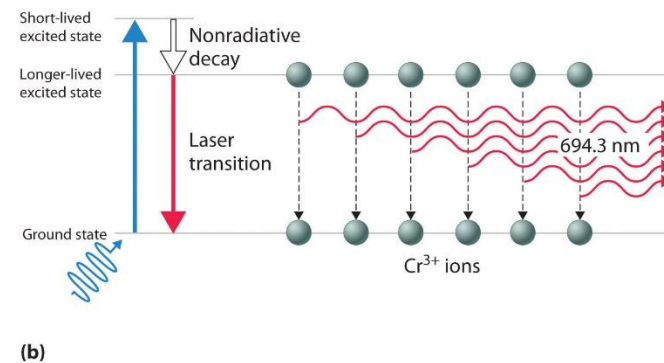
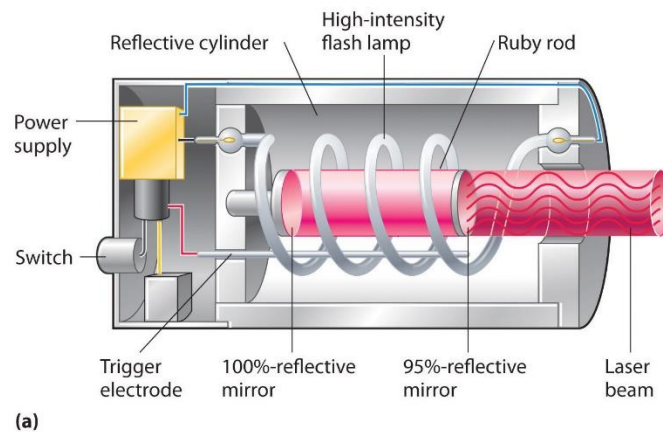
*Nobelovy ceny, 1937

Laser

Polovina 20.st

Theodore Harold Mainman (1927-2007)

- 1960, první LASER (rubínový)
- Koharentní záření pomocí jevu stimulované emise - předpovězen Einsteinem (1917)



Optika

2.polovina 20.st

Masivní rozvoj v oblasti aplikované optiky, vznik nových oborů

- Od výzkumu přes průmyslové po armádní aplikace.
- Lasery, holografie, adaptivní optika
- Nelineární optika, vláknová optika
- Difrakční optika
- Integrovaná optika, optoelektronika
- Metamateriály

